

# 압전 세라믹을 이용한 스마트 웨어용 진동-촉각 액추에이터

## Vibro-tactile Actuator for Smart Wear Applications Using Piezoelectric Ceramic Transducers

손 정 우\* · 강 한 결\* · 최 승 복\*\* · 김 기 우†

Jung Woo Sohn, Han Gyeol Gang, Seung Bok Choi and Gi-Woo Kim

(Received November 4, 2016 ; Revised November 30, 2016 ; Accepted November 4, 2016)

**Key Words :** Piezoelectric Ceramic Transducers(압전 세라믹 변환기), Vibro-tactile(진동-촉각), Smart Wear(스마트 웨어), Experimental User Study(사용자 평가 실험)

### ABSTRACT

In this study, the vibration-based tactile actuator for smart wear applications is presented by using piezoelectric ceramic transducers. The compact wireless actuation system is constructed with a high voltage piezoelectric amplifier, a microcontroller, wireless communication module, and rechargeable lithium-polymer battery. For the wireless communication between a hardware and an operator, the bluetooth-based wireless communication system is prepared and the user interface is provided via smart phone applications. From a series of experimental user studies, it is demonstrated that the proposed vibro-tactile actuator based on piezoelectric ceramic transducers can be effectively applied to smart wear applications.

### 1. 서 론

스마트 웨어는 기능성 섬유를 이용하여 제작되는 새로운 개념의 웨어러블(wearable) 의류로서, 센서, 마이크로프로세서, 액추에이터가 내장되어 있어 외부 자극에 대하여 반응할 수 있는 지능형 의류이다. 급격하게 발전하고 있는 정보통신기술(ICT)과 결합하여 네트워크에 연결되어 사물인터넷(IoT)으로 활용도 기대되고 있다. 기존 의류를 스마트 웨어로 대체하기 위해서는 스마트 기능뿐만 아니라 안전성, 내구성, 세탁 등의 편의성, 패션의 심미성 등 의류의 기본적인 조건을 모두 만족해야 하므로, 기계 및

전자 공학뿐만 아니라, 섬유, 패션, 디자인 등 여러 분야에서 관심을 갖고 연구가 진행되고 있다. 최근에는 전자섬유 기술의 발달과 함께 전자장치를 부착하는 형태에서 실 형태의 전도성 섬유를 기반으로 직물을 제작하는 것으로 연구가 진행되고 있다.

스마트 웨어와 관련한 대부분의 연구들은 건강 상태 측정 등을 위한 센서 시스템에 대한 내용이 주를 이루고 있다. Lymberis와 Paradiso는 지능형 섬유와 상호작용이 가능한 직물에 관한 연구 동향과 향후 도전 과제들에 대하여 보고하였다<sup>(1)</sup>. Borges 등은 사람의 건강 상태 모니터링을 위한 스마트-의류 프로젝트를 소개하면서, 압력 센서, 압전 필름 센서 등과 함께, 다양한 전자 및 통신 모듈 등의 적

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University  
E-mail : gwkim@inha.ac.kr

\* Member, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology

\*\* Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

용을 소개하였다<sup>(2)</sup>. Cho 등은 센서 측정을 이용한 건강관리용 스마트 웨어의 가능성을 탐색하고 디자인 프로토타입을 제안하여 심장박동, 혈압, 맥박, 체온 등을 측정할 수 있는 것을 확인하였다<sup>(3)</sup>. Song과 Lee는 자카드 직조 직물을 기반으로 한 심전도 측정용 직물 전극을 설계하고 실험을 통하여 성능을 확인하였다<sup>(4)</sup>. Lee는 유도용량성 센서를 이용하여 심장활동을 모니터링 할 수 있는 시스템을 포함하는 스마트 웨어를 제안하고 직물 전극의 유형에 따른 심장활동 모니터링 성능에 대하여 고찰하였다<sup>(5)</sup>. Park 등은 스마트 웨어에 장착된 멀티 센서에서 측정된 정보를 바탕으로 사용자의 상황과 행동을 추론하는 기법을 제안하고 실험을 통하여 유용성을 확인하였다<sup>(6)</sup>. Cho는 스마트 웨어를 기반으로 하는 유헤스케어 시스템의 하드웨어와 소프트웨어 모듈의 설계 방법을 제시하였다<sup>(7)</sup>.

스마트 웨어용 액추에이터에 대한 최근 연구 결과를 살펴보면, Leng 등은 형상기억폴리머의 특성과 다양한 응용 분야에서 스마트 섬유, 스마트 직물 또는 스마트 의류에의 적용 가능성을 제시하였다<sup>(8)</sup>. Abel 등은 형상기억합금을 이용한 편물의 2차원 해석적 모델을 제안하고 실험을 통하여 검증하였다<sup>(9)</sup>. MIT의 Holschuh와 Newman은 치료용 압박복에 적용하기 위하여 능동 소재인 형상기억합금과 수동 소재인 섬유를 결합하는 모델을 제안하고, 성능을 예측하였다<sup>(10)</sup>. 국내에는 스마트 웨어의 액추에이터 활용 가능한 소재로 전기활성고분자(EAP)를 소개한 연구와 의복 내 온도와 습도 조절을 위한 개폐 장치인 스마트 슬릿의 액추에이터로 형상기억합금(shape memory alloy)을 제안하고 작동성을 확인한 기초 연구가 있다<sup>(11,12)</sup>. 그러나 이러한 연구들은 가능성 있는 액추에이터의 소개에 그치거나, 사람에게 인지가 가능하도록 작동하는 형태가 아니라 의류 내부의 소형 슬릿을 개폐하기 위해 액추에이터를 사용하는 것으로 피부와 상호 작용이 가능한 형태의 스마트 웨어를 위한 액추에이터에 대한 연구는 전무한 실정이다. 피부와의 상호 작용을 위한 액추에이터는 빠른 응답 속도, 저 전력, 다양한 입력 인터페이스 등을 제공할 수 있어야 한다.

이 연구에서는 압전 세라믹을 이용하여 스마트 웨어에 적용하기 위한 진동 기반의 액추에이터를 설계하고 제작하여 실험을 통하여 성능을 평가하였다.

기존 선형 공진 모터와 비교 실험을 수행하여 제작된 압전 액추에이터의 성능을 평가하였다. 또한 제작된 압전 액추에이터를 이용하여 실제 피부가 감지하는 진동 강도와 신체 피부 부위에 따른 성능 차이를 사용자 평가 실험을 통하여 성능을 비교하고 적용 가능성을 확인하였다.

## 2. 시스템 구성

기존 편심형 진동 모터는 저가이나 응답 속도가 늦고 주파수와 진동 강도를 조절할 수 없는 단점이 있고, 선형 공진 모터는 공진을 이용하므로 단일 주파수에서만 진동 강도가 우수한 단점이 있다. 압전 액추에이터는 응답 시간이 매우 빠르고, 소비 전력이 낮으며, 다양한 주파수 조절이 가능한 장점이 있다. 이 연구에서 제안한 압전 액추에이터의 개념을 Fig. 1에 나타내었다. 가격이 저렴하고 부피가 작은 다이어프램 형태의 압전 세라믹을 신체에 밀착된 스마트 웨어 내부에 부착하고 진동을 발생시켜 사용자에게 진동 신호를 전달할 수 있도록 하였다. 다이어프램 형태의 지름 20 mm, 두께는 0.21 mm의 진동판에 지름 13 mm, 두께는 0.21 mm의 압전 세라믹이 3개 부착되어 있는 형태이다. 신체에 부착되는 압전 세라믹 부분을 제외하고 나머지 하드웨어 부분은 소형 파우치에 보관될 수 있도록 하였다. 압전 액추에이터 모듈을 구동하기 위한 하드웨어 시스템을 구성하였고, 이를 Fig. 2에 나타내었다. PC와 연결하지 않고 독립적으로 제어할 수 있도록 웨어러블 마이크로 프로세서(LilyPad)를 사용하였다. 배터리는 충전이 가능한 리튬-폴리머 타입을 사용하였으며, 배터리 보호 회로와 안정적인 전원 공급을 위한 레귤레이터 회로를 함께 구성하였다. 압전 액추에이터에 전압을 인가하기 위해서 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 이 연구에서는 Texas Instrument에서 개발한 고성능 소형 압전 드라이버(DRV 2667)를 내장한 칩 형태의 고전압 증폭 장치(piezo driver, PDU100)를 사용하여 스마트 웨어 적용이 가능하도록 하였다.

이 연구에서 사용된 제어보드는 “Simblee” 마이크로프로세서를 포함하고 있어, “Simblee”에서 제공하는 모바일 어플리케이션을 이용하여 스마트폰에서 사용할 수 있는 사용자 인터페이스를 제작할 수 있으며, 제어보드에 포함된 블루투스 모듈을 이용하여

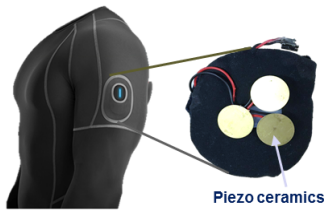


Fig. 1 The proposed vibro-tactile actuator system

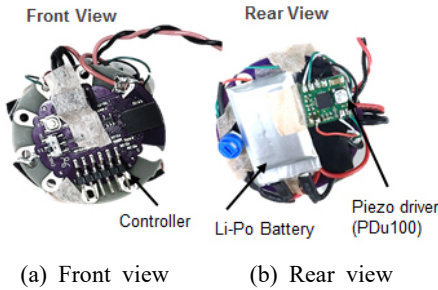


Fig. 2 Hardware system of the vibro-tactile actuator

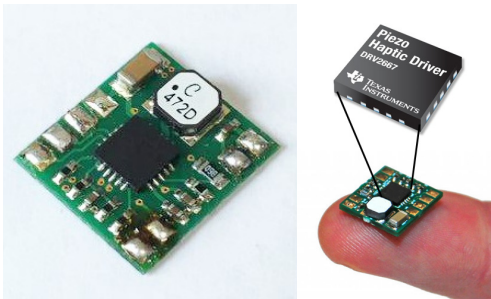


Fig. 3 High voltage amplifier with piezo haptic driver

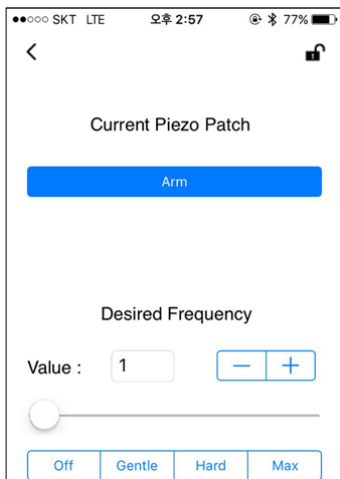


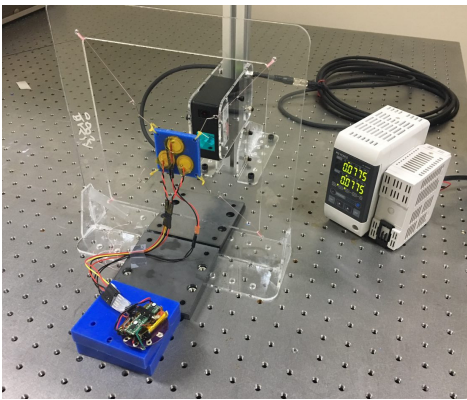
Fig. 4 User interface for smart phone

무선으로 액추에이터를 제어할 수 있다. 이 연구에서 제작한 사용자 인터페이스 화면을 Fig. 4에 나타내었다. 압전 액추에이터에는 일정한 크기의 전압이 인가되도록 기본 설정하였고, 사용자 인터페이스를 통하여 인가되는 전압의 주파수를 0 Hz에서 250 Hz 내에서 변경할 수 있도록 하였다. 주파수는 숫자 키 패드, 버튼, 슬라이더 등의 다양한 방식으로 조절할 수 있도록 하였고, 기본 주파수를 설정하여 사용할 수도 있게 하였다.

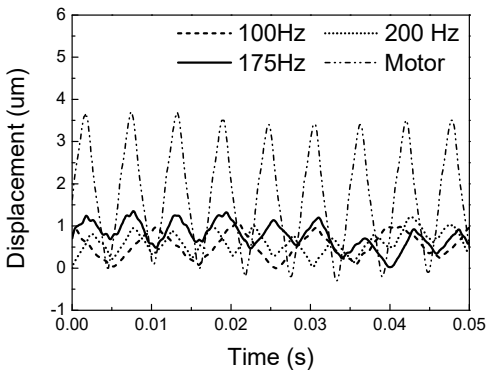
### 3. 진동 강도 비교 실험

이 연구에서 개발된 압전 액추에이터의 진동 강도를 실험을 통하여 검증하였다. 현재 스마트폰에서 일반적으로 사용되고 있는 선형 공진 모터(linear resonant actuator, LRA)와 비교 실험을 수행하여 상대적인 진동 강도를 비교하였다. 진동 강도 측정 실험을 위한 장치를 Fig. 5에 나타내었다. 압전 액추에이터 모듈을 육면체 시편에 부착하고, 레이저 변위 센서를 이용하여 시편에 발생하는 변위를 측정하였다. 가속도계를 부착하여 측정할 수도 있으나, 시편의 크기와 무게가 작아 가속도계가 진동 강도에 영향을 줄 우려가 있으므로 비접촉 방식의 레이저 변위 센서를 사용하였다. 시편은 MC Nylon으로 제작되었고, 길이 50 mm, 폭 50 mm, 두께 5 mm이며, 무게는 15.5 g이다. 주변 환경의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 와이어를 사용하여 공중에 떠 있는 상태에서 진동 강도를 측정하였다. 선형 공진 모터에는 DC 2 V의 사각파 전압을 인가하였고, 압전 액추에이터에는 80 V의 사각파 전압을 인가하여 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 측정된 변위를 Fig. 6에 나타내었다. 선형 진동 모터는 최대 3.6  $\mu\text{m}$ 의 변위가 발생하며, 175 Hz의 단일 주파수로 작동되는 것을 확인할 수 있다. 압전 액추에이터의 경우 100 Hz, 175 Hz, 200 Hz 세 가지 주파수 가진에서 약 1  $\mu\text{m}$ 의 변위가 발생하여 선형 공진 모터에 의한 변위에 비해 약 70 % 감소하는 것을 확인할 수 있다.

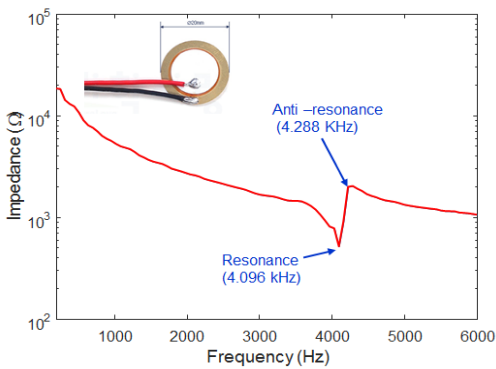
진동 강도 실험 결과에 대해서 다음과 같이 두 가지 원인을 찾을 수 있다. 첫째, 선형 공진 모터는 175 Hz의 공진을 이용하여 작동되므로, 가장 큰 진동이 발생하게 된다. 그러나, 이 실험에 사용된 압전 액추에이터 모듈은 공진을 이용하지 않는 형태이



**Fig. 5** Experimental setup for measurement of vibration magnitude

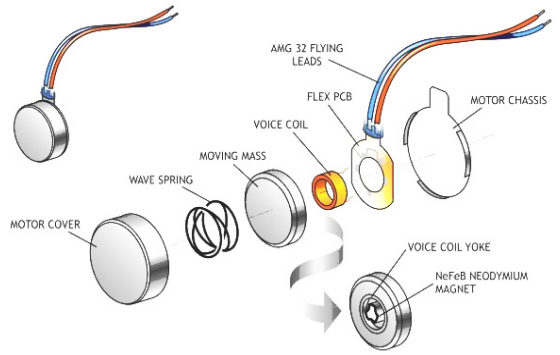


**Fig. 6** Measured displacement of mass



**Fig. 7** Measured impedance characteristics of piezo ceramic

다. 압전 액추에이터의 임피던스 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 압전 액추에이터 자체는 약 4000 Hz에서 공진을 갖고 있으며, 진동력 발생을 위한



**Fig. 8** Structures of linear resonant actuator

추가적인 질량을 사용하지 않았으므로 진동을 이용할 수 없으며, 상대적으로 변위가 작게 발생한다. 그러나 다양한 주파수에서 일정한 진동 강도를 갖고 있으므로, 인가 주파수를 조절하여 다양한 신호를 생성할 수 있는 장점을 갖게 된다. 둘째, 시편에 부착된 선형 진동 모터는 Fig. 8에 나타난 것과 같은 구조적 특징으로 시편의 두께 방향으로 진동을 발생시킨다<sup>(13)</sup>. 그러나 시편에 부착된 압전 액추에이터는 면내 방향으로 작동력이 발생하므로, 두께 방향의 변위는 상대적으로 작게 된다. 이 실험에서는 레이저 변위 센서를 이용하여 시편 두께 방향의 변위를 측정하므로, 압전 액추에이터를 이용한 경우 상대적으로 작은 변위가 발생하게 된다.

#### 4. 사용자 평가 실험

사람이 실제 느끼는 진동의 강도를 확인하기 위하여 사용자 평가 실험을 수행하였다. 스마트폰과 유사한 형태의 시편을 준비하고, Fig. 9와 같이 시편에 선형 공진 모터와 압전 액추에이터 모듈을 부착하여 진동을 발생시키도록 하였으며, 사람이 손으로 시편을 잡고 진동의 강도를 느낄 수 있도록 하였다. 실험을 위한 시편은 MC Nylon으로 제작하였으며, 길이 170 mm, 폭 70 mm, 두께 5 mm, 무게는 75 g이다. 6명의 피실험자가 실험을 수행하였고, 20대 초반의 학생들이며 남학생 3명, 여학생 3명이 동일하게 참여하였다. 선형 공진 모터를 동작할 때 피실험자가 느끼는 진동의 강도를 10으로 하였을 때, 압전 액추에이터를 동작하였을 때 피실험자가 느끼는 주관적인 진동 강도를 수치로 나타내도록 하여 상대적

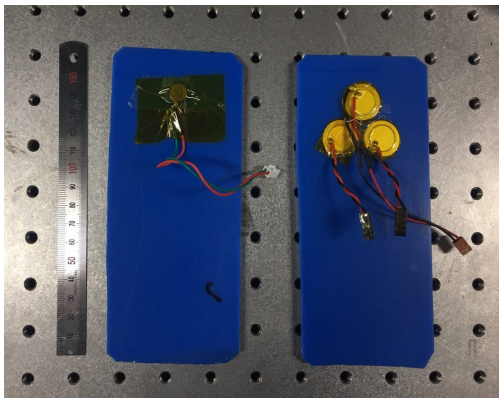


Fig. 9 Specimen for vibration magnitude comparison

Table 1 Comparison of vibration magnitude difference according to actuator

Excitation	Experimenters						Ave.
	A	B	C	D	E	F	
LRA 175 Hz	10	10	10	10	10	10	10
Piezo 100 Hz	6	4	2	2.5	2.5	4	3.5
Piezo 175 Hz	8	7	3	4.5	4	6	5.4
Piezo 200 Hz	8	5.5	5	3.5	3.5	4.5	5.0

Table 2 Comparison of vibration magnitude difference according to human body part

Location	Experimenters						Ave.
	A	B	C	D	E	F	
Palm	10	10	10	10	10	10	10
Back of hand	6	8	10	5	7	8	7.3
Upper arm	6	4	10	0	10	6	6.0
Hip	0	0	0	0	1	1	0.3
Thigh	2	3	1	1	0	1	1.3

으로 비교하였고, 실험 결과는 Table 1과 Fig. 10에 나타내었다. 모든 실험 참가자가 압전 액추에이터에 의한 진동을 선형 공진 모터의 진동보다 작게 느끼는 것으로 나타났다. 주파수에 따른 압전 액추에이터의 진동 강도는 산술 평균을 바탕으로 보면 175 Hz에서 가장 크게 느끼고, 100 Hz에서 가장 작게

느끼는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 Fig. 6의 변위 측정 결과와 다소 차이가 있다. 또한 Fig. 6의 결과에서는 선형 공진 모터에 비하여 압전 액추에이터에 의한 진동 변위는 70 % 정도 감소하였으나, 사람이 느끼는 진동 강도는 175 Hz의 경우 약 45 % 정도 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 사람이 진동을 느끼는 민감도가 주파수에 따라 다르기 때문인 것으로 판단된다. 사람이 촉각을 느끼는 피부 속의 기계적 수용체 중 파치니언 소체(Pacinian corpuscle)는 10 Hz에서 500 Hz 사이의 진동을 감지하는 수용체로, 150 Hz에서 250 Hz 사이의 주파수를 갖는 진동에 상대적으로 민감하게 반응하는 특성이 있다. 스마트폰에 사용되는 선형 공진 모터가 175 Hz 또는 200 Hz의 공진을 이용하는 것도 동일한 이유 때문이다.

압전 액추에이터 모듈의 신체 부착 위치에 따라 사람이 느끼는 진동 강도의 차이를 확인하기 위한 사용자 평가 실험을 수행하였다. 6명의 동일한 피실험자가 실험을 수행하였고, 20대 초반의 학생들이며 남학생 3명, 여학생 3명이 동일하게 참여하였다. 액추에이터 부착 부위는 진동을 가장 잘 느끼는 손바닥, 손의 운동에 대한 신호를 줄 수 있는 손등, 팔의 운동에 대한 신호를 줄 수 있는 상박, 다리의 운동에 대한 신호를 줄 수 있는 허벅지, 허리 운동에 대한 신호를 줄 수 있는 엉덩이를 선정하였다. 상박은 암밴드를 착용하는 위치이고, 허벅지와 엉덩이는 휴대폰을 주머니에 넣고 진동 신호를 인지하는 위치인 것도 함께 고려하였다. 피실험자가 손바닥에서 느끼는 진동의 강도를 10으로 하였을 때, 액추에이터가 부착된 다른 신체 부분에서 느끼는 진동의 상대적인 강도를 숫자로 나타내도록 하였고, 실험 결과는 Table 2와 Fig. 11에 나타내었다. 실험 결과에서 보는 바와 같이 모든 실험 참가자가 신체 다른 부위에서 손바닥보다 진동을 약하게 느끼는 것으로 나타났다. 산술 평균으로 보면 손등에서는 약 27%, 상박에서는 약 40 %, 허벅지에서는 약 87 %, 엉덩이에서는 약 97 % 진동 강도가 감소한다. 이러한 결과로 미루어 상박에서는 진동을 이용한 신호 전달이 가능할 것으로 보이나, 허벅지와 엉덩이 부위에서는 진동을 이용한 정보 전달 방식이 적절하지 않은 것으로 판단된다. 이렇게 신체 부위에 따라 진동 강도를 다르게 느끼는 것은 신체 부위에 따라 촉각에

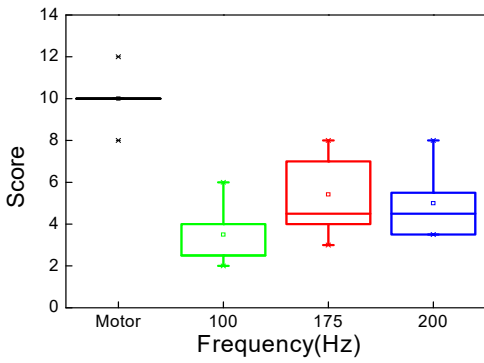


Fig. 10 Experimental result for vibration magnitude comparison

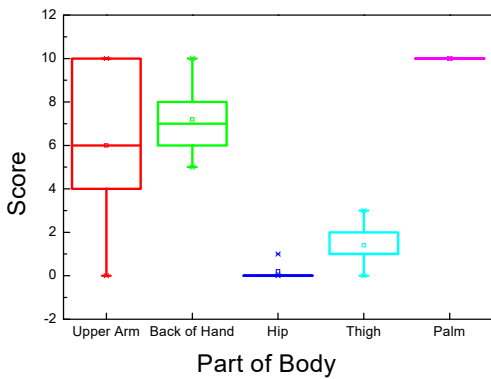


Fig. 11 Experimental result for vibration magnitude difference according to human body part

대한 민감도가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 손가락, 발가락, 입술, 혀 등에서 민감도가 높고, 허벅지, 종아리, 엉덩이 등에서는 상대적으로 민감도가 낮은 것으로 알려져 있다<sup>(14)</sup>.

### 5. 결 론

이 연구에서는 스마트 웨어에 적용하기 위한 압전 세라믹 기반의 진동-촉각 액추에이터 시스템을 구성하고, 실험을 통하여 성능을 평가하였다. 다이어 프레임 형태의 상용 압전 세라믹을 이용하여 액추에이터 모듈을 구성하고, 이를 구동하기 위한 하드웨어와 소프트웨어 시스템을 구성하였다. 블루투스 기반의 무선 통신을 활용하여 스마트폰을 이용하여 사용자가 액추에이터의 동작을 제어할 수 있도록 하였

다. 현재 스마트폰에 사용되고 있는 상용 선형 공진 모터와 비교 실험을 수행하여 제작된 압전 액추에이터의 작동력을 평가하였고, 실제 사람이 느끼는 진동 모터와 압전 액추에이터의 진동 강도를 사용자 실험 평가를 통해 비교하여 제안된 압전 액추에이터의 사용성을 평가하였다. 또한 신체 부착 부위에 따라 사람이 느끼는 진동 강도를 사용자 평가를 통하여 비교하여 적절한 부착 부위를 확인하였다. 이러한 결과는 스마트 웨어 적용을 위한 액추에이터 연구의 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 직물 형태의 개선된 액추에이터 제작, 촉각 액추에이터 성능 개선, 피부 생리학적 특성과의 연관성, 충분한 피실험자 확보를 통한 인지 특성 평가에 대해 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

### 후 기

이 논문은 인하대학교 일반수탁연구지원사업에 의하여 연구되었음(INHA-53964).

### References

- (1) Lymberis, A. and Paradiso, R., 2008, Smart Fabrics and Interactive Textile Enabling Wearable Personal Applications: R&D State of the Art and Future Challenges, Proceedings of the 30th Annual International IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 5270-5273.
- (2) Borges, L. M., Rente, A., Velez, F. J., Salvado, L. R. and Lebres, A. S., 2008, Overview of Progress in Smart-clothing Project for Health Monitoring and Sport Applications, Proceedings of the First International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, pp. 1-6.
- (3) Cho, H. Y., Lee, J., Lee, C. K. and Lee, M., 2006, A Development of Design Prototype of Smart Clothing for Healthcare Based on Sensing Technology of Vital Signs, Proceedings of the Annual Conference of Korea Human Computer Interaction, pp. 227-232.
- (4) Song, H. and Lee, J., 2010, A Design of Jacquard Woven Textile Electrode to Monitor the Electrical Activity of the Heart for Smart Clothing, Journal of the Korea Fashion & Costume Design

Association, Vol.12, No. 2, pp. 119-129.

(5) Lee, J. H., 2013, Smart Wear: Heart Activity Monitoring System Using Inductive Sensors, The Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineering, Vol. 62, No. 12, pp. 21~27.

(6) Park, H., Jeon, B. and Ryu, D., 2013, A Study for Context-awareness based on Multi-sensor in the Smart-clothing, Journal of the Institute of Internet Broadcasting and Communication, Vol. 13, No. 3, pp. 71~78.

(7) Cho, B., 2016, Design of U-healthcare System based on Smart-cloth, Journal of Korea Institute of Information, Electronics and Communication Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 237~242.

(8) Leng, J. Lan, X., Liu, Y. and Du, S., 2011, Shape-memory Polymers and Their Composites: Stimulus Methods and Applications, Progress in Materials Sciences, Vol. 56, No. 7, pp. 1077~1135.

(9) Abel, J., Luntz, J. and Brei, D., 2012, A Two-dimensional Analytical Model and Experimental Validation of Garter Stitch Knitted Shape Memory Alloy Actuator Architecture, Smart Materials and Structures, Vol. 21, No. 8, pp. 085011 (18pp).

(10) Holschuh, B. and Newman, D., 2015, Two-spring Model for Active Compression Textiles with Integrated NiTi Coil Actuators, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 3, pp. 035011 (14pp).

(11) Kim, H. J., 2016, Electroactive Polymer for Smart Wear Actuator, Fiber Technology and Industry, Vol. 20, No. 3, pp. 117~123.

(12) Kim, S. G. and Yoo, S. J., 2016, A Study on Types of Bi-directional Shape Memory Actuator for Smart Wear Development, Proceedings of 2016 Annual Spring Conference of Korean Society for Emotion and Sensibility, p. 99.

(13) <http://www.precisionmicrodrives.com>

(14) Sohn, J. W., 2012, Human Haptics, Journal of KSNVE, Vol. 22, No. 5, pp. 27~31.



**Jung Woo Sohn** received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is now working as an associate professor in the Department of Mechanical Design Engineering of

Kumoh National Institute of Technology. He has interest on the design and control of smart structures and systems using smart materials such as piezoelectric materials, shape memory alloys and ER/MR fluids.



**Gi-Woo Kim** received his Ph.D. degree from the Mechanical Engineering Department at the Pennsylvania State University (USA) in 2009. He worked for the Hyundai Motor Company Powertrain R&D Center from

1996 to 2004 and in the Mechanical Engineering Department at the University of Michigan from 2009 to 2011. He has worked as an assistant professor at the Kyungpook National University from 2011 to August 31 2015. He is currently working at the Inha University as an associate professor since Aug. 2015. His research topics include a smart-material-based sensor and actuator, vehicular electronic control, torsional vibration control, and vibration-based energy harvesting and so on.